

文章编号: 1002-0268 (2001) 01-0039-05

# 大跨钢箱梁斜拉桥施工控制要点分析

常 英

(湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 由于大跨钢箱梁斜拉桥结构自身的特性, 风载、温度荷载等对其施工控制影响较大, 为确保此类桥施工控制的准确性, 必须对施工控制计算参数进行识别、修正。本文以武汉军山长江大桥主桥大跨钢箱梁斜拉桥施工控制为实例, 分析了影响大跨钢箱梁斜拉桥施工控制的这两大要点。

**关键词:** 大跨径; 钢箱梁; 斜拉桥; 施工控制

中图分类号: U448.213

文献标识码: A

## Analysis of Key-points for Construction Control of Long-span Steel Box-girder Cable-stayed Bridge

CHANG Ying

(Communications Planning and Design Institute of Hubei Province, Hubei Wuhan 430051, China)

**Abstract:** Construction control of long-span steel box-girder cable-stayed bridges will be influenced dramatically by both wind and temperature load, owing to the structural characteristics. In order to control the construction of such bridges accurately, it's necessary to verifying and adjusting calculating parameters to by control. Providing an instance of Wuhan Junshan Yangtze River Bridge, the thesis analyses the two key-points which influence construction control of long-span steel box-girder cable-stayed bridge.

**Key words:** Long-span; Steel box-girder; Cable-stayed bridge; Construction control

### 0 前言

斜拉桥以其简洁优美的外形及良好的跨越能力被广泛采用。近年来, 随着交通量的剧增, 桥面宽度及跨径均呈加大趋势, 传统的混凝土主梁斜拉桥已难以满足实用要求, 大跨钢箱梁斜拉桥也因此应运而生了。但该类桥的施工控制与以往的混凝土主梁斜拉桥的施工控制存在着较大差异, 故而施工控制必须因桥

而异, 采取有针对性的措施。本文结合武汉军山长江大桥主桥大跨钢箱梁斜拉桥的施工控制实践, 通过分析大跨钢箱梁斜拉桥结构本身的固有特点, 介绍了在此类桥的施工控制过程中, 消除索力测试中的风致索力及应力测试中的温度荷载引致的二次应力方法, 以供同仁参考。

武汉军山长江大桥主桥为五跨连续双塔双索面半飘浮体系钢箱梁斜拉桥(如图1示)。主梁采用封闭扁

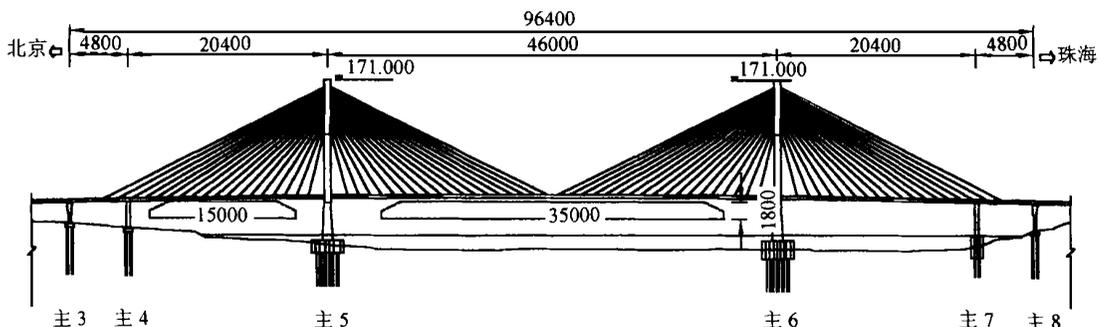


图1 武汉军山长江公路大桥斜拉桥桥型布置图

收稿日期: 2000-04-03

作者简介: 常英 (1975-), 女, 广东五华人, 工程师, 硕士。

平流线形钢箱梁, 梁高 3.0m, 梁全宽 38.8m, 桥面净宽(不含斜拉索锚固区宽度) 33.5m, 双向六车道。

该桥风稳性的两个主要技术参数:

$$B/L = 1/13.7 > 1/15, \quad B/H = 11.2 > 10.$$

可见, 其风稳性是较好的, 风洞试验结果也证实了这一点。

## 1 大跨钢箱梁斜拉桥的结构特点

作为斜拉桥家族中的一员, 大跨钢箱梁斜拉桥秉承了斜拉桥家族固有的品质——外形美观, 梁矮而跨越能力大, 良好的动力特性等。除此而外, 它亦具有如下特点:

1. 纵横向跨越能力大。大跨钢箱梁斜拉桥因采用自重较轻的钢箱梁主梁, 比较混凝土主梁斜拉桥而言, 同等截面积的索便能跨越更大的跨度及更宽的桥面。另外, 较轻的主梁自重, 使得主梁的线形更易调整。

2. 建设周期短。该型桥钢箱梁因为工厂化生产, 其制作精度高, 与设计偏差较小, 且可与下构及主塔平行作业, 节省了工期。加之现均采用栓接或焊接连接方式, 架梁周期也大为缩短, 进而节省了成本, 社会经济效益显著。

3. 主梁无徐变。该型桥因主梁采用钢箱梁, 故主梁部分不存在徐变效应, 进而也不会产生因徐变而引起的结构内力的二次重分布, 分析中省去了计算主梁徐变。

4. 对温度变化敏感。因该型桥主梁采用钢箱梁, 而钢材的容热性差, 故其对温度变化异常敏感, 实桥架设过程中, 可明显看到主梁悬臂端随温度的升降有规律地变化。故在架梁过程中, 应对观测及架梁时机有机地进行选择; 且在设计及控制计算时, 对有温度荷载参与的各种荷载组合进行详细分析计算。

5. 动力性能好。钢箱梁斜拉桥比之砼主梁斜拉桥, 其刚度相对要小, 故动力性能更佳, 更适宜于在震区修建。

6. 防腐性差。因大跨斜拉桥多用于跨越大江大河, 其外界环境因风霜雨雪、盐碱湿气等而显恶劣, 加之钢材若直接暴露在空气中, 其防腐蚀能力极差。故, 比之砼主梁斜拉桥, 必须加强防腐工作。当然, 随着相关学科的进展, 关于钢箱梁的长效防腐问题, 通过在梁体内外表面进行防腐涂装, 可以取得较好的效果。

## 2 施工控制

该型桥在施工过程中, 会由于设计、计算参数等

与实际工程中所表现出来的对应参数不完全一致而产生偏差。

在运营过程中, 也会由于斜拉索的应力松弛、塔砼的收缩、徐变、日照温差、风雪荷载及基础沉降等因素的影响, 结构的线形与内力都会发生变化。

故为确保该型桥的施工及运营安全, 必须进行施工控制。

斜拉桥的施工控制通常采用“双控”——标高控制与内力控制。其具体内容包括两方面: 数据的采集与数据的分析。本文重在分析大跨钢箱梁斜拉桥因自身的特点而决定的必须在施工控制过程中加以仔细研究的部分, 其与砼主梁斜拉桥雷同的部分恕不赘述。

众所周知, 影响大跨钢箱梁斜拉桥施工控制的因素较多, 而风载及温度是其中影响较大的。大跨钢箱梁斜拉桥由于既轻且柔, 索力微小的偏差将反映在主梁线形上, 而当风载作用在斜拉索上时, 势必引致索内产生风致索力, 这对于我们控制主梁线形是不利的, 必须通过分析加以排除。另一方面, 密索体系斜拉桥为一内部高次超静定结构, 由于钢材容热性差, 以及主梁温度场的非线性, 温度荷载引致二次应力在所难免。为尽可能真实地测得结构内力, 我们也必须采取措施来滤除温度荷载对内力测试的影响, 以确保施工控制的准确性。下面按上述施工控制内容分别对此二要点进行分析。

### 2.1 数据的采集

#### 2.1.1 索力的测试

斜拉桥索力测试不外乎两种方法: 直接法与间接法。直接法就是直接用测力计等来测定索力, 表现为两种形式: 采用压力表测定千斤顶液压, 再换算索力; 以及用压力传感器测定。所谓间接法即是频率法。在索的张拉和频率之间, 存在一定关系。

对于柔性索

$$T = \frac{4\omega L^2}{n^2 g} f_n^2$$

式中,  $\omega$ ——单位索长度索重;

$L$ ——索长;

$f_n$ ——第  $n$  阶频率。

对于两端铰接的刚性索

$$T = \frac{4\omega L^2 f_n^2}{n^2 g} \frac{n^2 EI}{L^2}$$

式中,  $EI$ ——索的弯曲刚度。

采用频率法测索力, 关键在于判定拉索的各阶频率, 通常我们采用精密的拾振器拾振, 通过频谱分析来进行。这其中, 对于频率的误差分析往往被忽视

了。

该大桥单根索力测试采用油压表配合套筒式压力传感器进行,而索力联测则采用频率法进行。在本桥的索力测试中,采用频率法进行的索力测试都引入了索的频率误差分析。

该桥拉索采用多次张拉法进行张拉。值得注意的是,在张拉千斤顶油缸回油、螺帽拧紧时,不可避免地出现索中实际初张力与油压表中所示值不同的情况。在张拉时,可适当超张拉一些,以抵消这一部分损失,甚至可作为预抬标高的储备,至于超多少,应视实际情况通过计算确定。

因本桥主梁自重较轻,仅为 14.5 吨/延米,每根索力的少量偏差最终将导致线形的明显偏差,故为确保主梁线形的准确,在施工控制过程中对索力的测试采取了特别的步骤:

(1) 定期对张拉千斤顶、油压表进行标定(以电测法为优);

(2) 将直接法(油压表、压力传感器)与间接法(加速度传感器)测得的结果进行比较,用直接法的结果来修正间接法的结果,进而识别出正确的计算参数以指导后续测量工作。

### 2.1.2 温度测试

因钢材容热性差,对温度变化十分敏感,而在分析中为简化计算,视其为内部线性变化,但这与实际情况是有出入的。钢箱梁为一空间结构,其温度场的分布就更为复杂,所幸,运用有限元方法,可以对箱梁内部的温度场的分布情况进行模拟。在选择该大桥的温度测点布置截面及布置位置时,就采用了 SS-AP91 软件的热分析模块,用三维热传导单元建立起热分析模型,模拟一个钢箱梁标准节段,对其内部的温度场分布情况仔细地进行数值分析,并据此来布置温度测点。

对索温的测量,在该大桥实测中,采用测温段结合三维有限元分析来进行。本桥测温段(2m 长)事先在拉索生产厂制作完成,然后悬挂在已挂拉索上,以其测得的温度场来模拟实桥索的温度场。

索塔砼的温度测点布置截面与位置同其应力测点。由于塔砼断面为箱形,且尺寸大,其温度场显而易见呈非线性分布。

### 2.1.3 测量时机的选择

合理地选择测量时机,可以人为地部分消除外因对测试结果的影响,从而保证施工控制的相对准确性。选择测量时机一般应遵循以下原则:

(1) 尽量选择无风或微风天气,以排除风荷载的

影响。

(2) 在清晨进行测量。多座实桥检测证明,经过夜间的热传导,梁、塔、索等构件内温度梯度相对较小,温度也较均匀。

(3) 测量时的气温应尽可能与桥位处年平均气温相近。

(4) 测量应在短时间内完成,以免测试条件变化太大。

(5) 测量时应将桥面吊机等施工机械停下来,以排除制动力的影响。

## 2.2 数据的分析

大跨钢箱梁斜拉桥施工控制的重要一环即是对采集到的数据进行分析。设计阶段进行结构计算时的各参数与实测得到的对应参数会不一致,因此,必须对参数进行识别与修正。此外,通过细致深入地分析采集到的数据,可对大跨钢箱梁斜拉桥的后续施工提供指导,并能预报结构下一阶段的行为。

参数识别是进行斜拉桥施工控制分析的有效途径。

所谓设计参数的识别与修正即是根据施工中结构的实测值对主要设计参数进行估计,然后将修正过的设计参数反馈到控制中去,重新给出施工中索力和挠度的理论期望值,以消除理论值与实测值不一致中的主要部分。

对大跨钢箱梁斜拉桥而言,因钢箱梁是工厂化生产的,其制作精度高,实际参数与设计参数相差颇小,而砼主塔,由于砼的收缩徐变系数、几何尺寸及自重等与设计不符,影响较大,故该桥在施工控制过程中,也注意了对这些参数的采集、识别与修正。本文着重于分析索力测试中风致索力的影响以及应力测试中温度应力的影响两部分,分述如下。

### 2.2.1 索力测试时消除风致索力的影响

实桥测试时,风致振动对索力测试结果的影响应设法消除。实桥上,风致或其它因素导致的斜拉索起振现象不可避免,而且不同的索,由风致振动引起的索力值是不同的,故这是一件较为棘手的工作。通过分析,因风振引起的索力应分解为两部分:一是风荷载直接作用在索上引起的内力,即静风响应索力;二是因风激而索起振导致索中产生的力,即抖振响应索力。在该桥的实测过程中,对 4 处有代表性的索进行了滤除风振影响的索力测试。具体作法如下。

首先测出加速度传感器处索附近的风速(平均值)。再建立起有限元分析的模型。接下来分别计算上述 2 部分索力:将风荷载作为外载加至索模型上,

算得索两端的力,此即为静风响应索力;至于抖振响应索力,仍沿用上一部分的有限元模型,只不过风载为一随时间变化的函数,将其加载,求索的强迫动力响应。最后用现场测得的索力值减去这两部分力值,即认为所得值为滤除风致索力影响后索力的实际值。

在采用有限元法进行风致索力分析时,索单元边界条件应尽可能符合实际情况,这对于提高分析精度尤为重要。

首先计算军山桥典型斜拉索的自振特性。斜拉索频率根据公式  $n_i = (i/2L) \cdot (T/m)^{1/2}$  ( $i$  为阶次) 计算,其中索长  $L$  按桥跨布置图中的计算长度取用,质量按容重  $8.2t/m^3$  计算。表1给出了中跨索面中典型斜拉索的基本结构参数及自振特性等。

为计算风致索力(静风响应索力与抖振响应索力之和),尚需先行算出本桥的设计基准风速和颤振检验风速。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)中全国基本风压分布图,军山长江大桥桥位处的风压为  $500Pa$ ,即  $20m$  高度处  $100$  年一遇的最大  $10min$  平均风速为  $V_{20} = \sqrt{1.5 \times 500} = 28.28m/s$ ,根据《公路桥梁抗风设计指南》(1996)折算的桥位处  $10m$  高度处  $100$  年一遇的最大  $10min$  平均风速为  $V_{10} = 0.836V_{20} = 23.64m/s$ 。另外,根据桥位附近江夏气象观测站观测资料分析所得  $10m$  高度处  $100$  年一遇的最大  $10min$  平均风速  $V_{10} = 24.20m/s$ 。我们偏于安全地取  $V_{10} = 24.20m/s$  作为确定设计基准风速和颤振检验风速的基本风速。

军山大桥典型斜拉索结构参数 表1

参数名称	A1(内索)	A9	A17	A18(外索)
索径 $D$ (m)	0.100	0.110	0.120	0.135
索长 $L$ (m)	83.6	164.4	243.7	255.2
索单位长度				
质量 $m$ (kg/m)	38.18	47.65	59.01	70.37
索力 $T$ (kg)	2.38E5	3.46E5	4.18E5	5.26E5
前四阶振型				
频率 $n$ (Hz)	1.48~5.92	0.81~3.24	0.54~2.16	0.5~2.12

按照梯度风风速沿高度变化的幂指数规律  $\frac{V_z}{V_{10}}$   $\left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$ ,考虑桥位处地表粗糙度类别和风压放大系数,成桥运营状态主跨桥面即离设计水位约  $40m$  高度处的设计基准风速为  $33.1m/s$ ,施工阶段的设计基准风速按  $10$  年重现期为  $27.8m/s$ ,按  $30$  年重现期为  $30.5m/s$ 。成桥运营状态的颤振检验风速为  $50.4m/s$ ,

施工阶段的颤振检验风速按  $10$  年重现期为  $42.3m/s$ ,按  $30$  年重现期为  $46.4m/s$ 。

接下来,即以上述风速为已知条件,运用有限元法求解风致索力。以本桥 A18 号索为例,此索为背索(主索),用 SSAP91 的线弹性材料杆单元(类型 21)进行模拟,视其为两端铰接。由规范知桥位处基本风压为  $500Pa$ ,则横向风压

$$W = K_1 K_2 K_3 K_4 W_0 = 1.0 \times 1.3 \times 1.13 \times 1.2 \times 500 = 881.4 Pa$$

已知 A18 索直径为  $D = 0.135m$ ,则作用在 A18 索上的静风力转换为均布线荷载为  $U_f = W \cdot D = 881.4 \times 0.135 = 0.119kN/m$ ,代入有限元模型求得静风响应索力如表2示。求抖振响应索力时,先将桥面索处记录所得风载  $U_f$  换算为作用于斜拉索跨中的集中力  $F$ ,再拟合为时间  $t$  的正弦函数  $F(t) = F \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$ ,将该式代入有限元模型求解,得抖振响应索力如表2示。

典型索风致索力表 表2

索号	索力			实测值 kN	$\frac{F_1 + F_2}{\text{实测值}}$ %
	$F_{11}$ kN	$F_2$ kN	$F_1 + F_2$ kN		
A1	1.6	15.9	17.5	2398	7.30
A9	3.0	27.4	30.4	3490	8.71
A17	4.4	34.0	38.4	4218	9.10
A18	5.4	41.3	46.7	5307	8.80

注:  $F_1$  为静风响应索力;  $F_2$  为抖振响应索力;  $F_1 + F_2$  即为风致索力。

表2知,对该桥4根典型索进行上述操作后所得结果表明,风致索力占总索力的比重接近1%,这对于既轻且柔的钢箱梁主梁斜拉桥来说,风致索力对主梁线形控制精度的影响较大。

### 2.2.2 温度测试

温度变化,特别是日照温差的变化对于斜拉桥结构内力和变形的影响是复杂的。施工阶段,日照温差对斜拉桥主梁挠度和塔柱水平位移的影响尤其显著。温度变化将在一定程度上影响结构变形实测值的真实性。为最大限度地消除温度荷载对施工控制精度的影响,采用有限元方法对索、塔及梁段的温度场分布分别进行了分析。通过比较实测值与有限元分析结果,发现二者吻合甚好。同时,经分析也发现,斜拉索由于断面尺寸较小,其温度场分布近似于线性的,而塔及梁由于为复杂的空间结构,其温度场分布很明显呈非线性。

由于施工控制任务的紧迫性,不可能对每种工况都进行温度场的分析,因此有必要找出温度场分布的

一般性规律。为此,对斜拉桥结构进行温度荷载作用下的分析计算。通过计算发现:

1. 当斜拉桥结构整体均匀升温或降温时,温度变化对主梁挠度的影响较小。这与砼和钢的线膨胀系数相近,梁、塔、索在相同温度变化下所产生的变形基本相同,是吻合的。因此,施工控制可不考虑季节温差对主梁线形的影响。

2. 日照温差对主梁挠度的影响则要比季节温差的影响大得多。随着主梁悬臂施工长度的增加,日照温差的影响愈加显著。但是如果要将日照温差所引起的结构变形从挠度实测值中分离出来则是相当困难的,这时可采用在一天中日照温差对结构变形影响最小的时候进行测量。所以,对于以标高控制斜拉索张拉或线形调整等与测量工作密切相关的施工控制工作,测量时机的选择,如前所述,是非常重要的。

基于此,实桥控制中,为滤除应力测试中温度荷载引致的结构二次应力及温度变形对线形控制的不利影响,采取了三管齐下的方式。首先是精心选择测量

时机,从措施上尽最大可能消除温度影响。其次,在应力测试时,采取温度补偿等方式来消除测试值中的温度应力。而对于线形的控制计算,则近似按温度梯度为线性分布进行计算,籍此来滤除温度荷载引致的结构二次应力及其对线形的影响。

### 3 结论

施工控制事关大跨钢箱梁斜拉桥的施工与运营安全。施工控制中的数据采集是进行施工控制的基础,而由于该类桥自身的结构特性决定了其施工控制准确性受风载及温度荷载的影响较大,本文结合实桥的施工控制,提出了消除此类桥施工控制过程中上述二要素影响的方法。经实践证实,本文所述思路具有很强的实用性与指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 王应良. 流线形扁平钢箱梁横隔板的应力分析和设计. 公路, 1999 (2): 13-16.
- [2] 林元培. 斜拉桥. 人民交通出版社, 1994.

(上接第 38 页)

有粘结非预应力筋的应力  $\sigma_s = 105.7 \text{ MPa}$

(f) 裂缝宽度验算<sup>[3]</sup>

$$w_{\max} = c_1 c_2 c_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left( \frac{30+d}{0.28+10\mu} \right)$$

$$= 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times \frac{105.7}{200\,000} \times \left( \frac{30+20}{0.28+0.006} \right)$$

$$= 0.092 \text{ (mm)} < 0.1 \text{ mm}$$

(g) 挠度验算<sup>[4]</sup>

开裂截面形心轴高度  $\bar{y} = 12.2 \text{ cm}$ , 开裂截面惯性矩  $I_{01} = 2.78 \times 10^5 \text{ cm}^4$ , 开裂弯矩  $M_{cr} = 730.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 使用荷载下构件的挠度

$$f = \frac{\alpha L}{0.85 E_c} \left( \frac{M_{cr}}{I_0} - \frac{M - M_{cr}}{I_{01}} \right)$$

$$= \frac{5}{48} \times \frac{15\,500^2}{0.85 \times 3.3 \times 10^4} \left( \frac{730.1 \times 10^6}{3.45 \times 10^{10}} \right)$$

$$+ \frac{(745.7 - 730.1) \times 10^6}{2.78 \times 10^9}$$

$$= 23.8 \text{ (mm)} < \frac{L}{600} = 26 \text{ mm}$$

本文采用预应力比率法来确定无粘结预应力筋和有粘结非预应力筋的用量,而后检查构件的实际预应力度是否满足结构的要求,并分析验算构件的实际抗弯强度及正常使用极限状态构件的应力、挠度、裂缝宽度。文中未涉及抗剪设计,这有待今后完善。用上述方法推算  $A_p$ 、 $A_s$  时,为使预应力度满足实际要求值,减少试算次数,建议初选  $i_p$  时,尽可能取较大的值。

#### 参考文献:

- [1] 杜进生, 赖国麟. 无粘结部分预应力混凝土受弯构件正截面抗弯强度计算方法的研究. 桥梁建设, 1997 (3): 13-15.
- [2] 杜进生, 赖国麟. 使用荷载下无粘结部分预应力混凝土梁的应力分析. 土木工程学报, 1998, 31 (1): 72-75.
- [3] 杜进生, 刘西拉. 无粘结部分预应力混凝土梁的挠度、裂缝宽度计算. 中国公路学报, 2000, 13 (4): 70-73.
- [4] 无粘结预应力混凝土结构技术规程 (JGJ/T92-93). 北京: 中国计量出版社, 1993.